



Programme Typologie des stations forestières

**Colloque de restitution
24-25 OCTOBRE 2007**

A ROUEN

**RESUMES
DES RAPPORTS FINAUX**

SOMMAIRE

I. MISE AU POINT D'OUTILS ROBUSTES D'ESTIMATION DE LA RICHESSE MINÉRALE ET DE LA PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL DU SOL UTILISANT LA VALEUR INDICATRICE DE LA FLORE, DES FORMES D'HUMUS ET DE LA PÉDOFAUNE.4

COORDINATEURS DU PROJET : Michaël Aubert, Laurent Bergès, Bernard Jabiol

II. ESTIMATION DU POTENTIEL STATIONNEL EN PEUPLEMENT MÉLANGÉ, IRRÉGULIER. EFFETS COMBINÉS DU MILIEU, DE LA COMPÉTITION ET DE LA SYLVICULTURE7

COORDINATEUR DU PROJET : Philippe Dreyfus

RECHERCHE D'INDICATEURS DU FONCTIONNEMENT RACINAIRE POUR AFFINER LA RELATION STATION-PRODUCTION : APPLICATION À LA CHÊNAIE DE TRONÇAIS.....13

COORDINATEUR DU PROJET : Jean Garbaye

QUELLES ATTENTES EN FORÊT PRIVÉE CONCERNANT LA « TYPOLOGIE DES STATIONS FORESTIÈRES » ? REPRÉSENTATIONS ET USAGES - CONDITIONS ET MOYENS D'UNE MEILLEURE ADÉQUATION DE L'OUTIL15

COORDINATEUR DU PROJET : Clotilde Giry

DÉVELOPPEMENT, SPATIALISATION ET VALIDATION D'INDICES BIOCLIMATIQUES.21

COORDINATEURS DU PROJET : François Lebourgeois (AgroParisTech), Catherine Cluzeau (IFN).. 21

LISTE ET ADRESSES DES COORDINATEURS DES PROJETS DU PROGRAMME TYPOLOGIE DES STATIONS FORESTIÈRES

	Titre des projets	Coordinateur du projet	Adresse mél
1	Estimation du potentiel stationnel en peuplement mélangé, irrégulier. Effets combinés du milieu, de la compétition et de la sylviculture	Philippe Dreyfus (Inra Avignon)	dreyfus@avignon.inra.fr
2	Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques	François Lebourgeois (AgroParisTech-ENGREF) Catherine Cluzeau IFN	lebourgeois@engref.fr ccluzeau@nancy.ifn.fr
3	Attentes et mobilisation des acteurs concernant la typologie des stations forestières. Représentations et usages : conditions et moyens d'une meilleure adéquation de l'outil.	Clotilde Giry (IDF-CNPPF)	clotilde.giry@cnppf.fr
4	Mise au point d'outils robustes d'estimation de la richesse minérale et de la production d'azote minéral du sol utilisant la valeur indicatrice de la flore, des formes d'humus et de la pédofaune	Mickael Aubert (Ecodiv)	michael.aubert@univ-rouen.fr
5	Recherche d'indicateurs du fonctionnement racinaire pour affiner la relation station-production : application à la chênaie de Tronçais	Jean Garbaye (INRA)	garbaye@nancy.inra.fr

Mise au point d'outils robustes d'estimation de la richesse minérale et de la production d'azote minéral du sol utilisant la valeur indicatrice de la flore, des formes d'humus et de la pédofaune.

COORDINATEURS DU PROJET

Michaël Aubert, Laurent Bergès, Bernard Jabiol

Rappel du contexte et des objectifs

L'objectif général de ce projet vise à mettre au point des indicateurs robustes d'estimation de la richesse minérale du sol par la flore et les formes d'humus. Il se décompose en deux principaux volets.

Le premier volet consiste, à partir de bases de données préexistantes, à tester si la flore constitue un indicateur robuste de la richesse minérale du sol, à différentes échelles spatiales (du massif au territoire national).

Le second volet consiste à tester si le type d'humus est aussi un bon indicateur de la richesse minérale du sol. Le premier objectif de ce volet est de tester, à partir de bases de données préexistantes, la pertinence de la typologie des formes d'humus pour rendre compte de la disponibilité en nutriments du sol, de comparer la précision de l'outil à différentes échelles spatiales (locale, régionale, nationale) ainsi que l'intérêt de la prise en compte des caractéristiques fines de l'humus pour améliorer l'estimation de la richesse minérale. Le second objectif consiste à approfondir, les relations existant entre la morphologie, la biologie de l'épisolum humifère et la minéralisation de l'azote afin de compléter les indicateurs de richesse minérale du sol par des indicateurs simples de fonctionnement en terme d'azote disponible facilement assimilable par les plantes.

Volet 1 : Utilisation des valeurs indicatrices de la flore pour caractériser la richesse minérale du sol

(Bergès L., Gégout J-C., Legrand C., Chevalier R.)

Nous avons cherché à valider la pertinence des nouvelles valeurs indicatrices (VI, indices de pH, S/T et C/N issus de la BD Ecoplant) pour rendre compte de la disponibilité en nutriments du sol, par le biais du calcul au niveau d'un relevé de la valeur indicatrice moyenne (VIM). Nous avons tenté d'optimiser la méthode de calcul de la VIM puis testé la robustesse des méthodes de prédiction de la richesse minérale par la flore selon la qualité des relevés.

Nous avons montré sur différents jeux de données que les indices pH, S/T, C/N issus d'Ecoplant sont d'aussi bons sinon de meilleurs prédicteurs que les indices R et N d'Ellenberg. Globalement, les indices d'Ellenberg ou Ecoplant sont de bons ou de très bons prédicteurs du pH et du taux de saturation, mais de moins bons prédicteurs de la disponibilité en azote dans le sol.

Les pistes d'optimisation de l'outil testées indiquent que : (1) il n'est pas nécessaire d'élaborer des VI régionales pour prédire la richesse minérale au sein de cette région : les VI nationales sont d'aussi bons et mêmes de meilleurs prédicteurs ; (2) il est inutile de tenir compte du coefficient d'abondance-dominance des espèces dans le calcul de la VIM ; (3) il est inutile de privilégier les espèces de faible

amplitude écologique vis-à-vis du gradient étudié au dépend des espèces à large amplitude; (4) la prise en compte des caractéristiques dendrométriques du peuplement (âge en futaie régulière et/ou volume total si les types de peuplement incluent d'autres types de peuplement) permet d'améliorer la prédiction de la richesse par la flore ; (5) il est préférable de ne pas sélectionner les espèces uniquement forestières pour le calcul de la VIM car lorsqu'on enlève les autres espèces (péri- et non-forestières), la prédiction est fortement dégradée.

Les approches menées pour tester la robustesse de l'outil VIM permettent de conclure que : (1) la VIM semble assez robuste au retrait des bryophytes, mais les résultats nous semblent fragiles et nous conseillons donc de continuer autant que possible d'inventorier les bryophytes ; (2) la VIM s'avère relativement robuste au retrait des espèces difficiles à identifier et/ou identifiables une partie de l'année seulement ; (3) la VIM est assez robuste face au niveau d'exhaustivité du relevé et l'essentiel de l'information apportée par la flore est acquise au bout de 10 à 15 min.

Une modernisation des outils de diagnostic stationnel nous semble désormais envisageable et les gestionnaires auraient intérêt à recourir au calcul d'une valeur indicatrice moyenne pour estimer la richesse minérale du sol (pH, S/T ou C/N).

Volet 2, objectif 1 : Analyse du lien entre type d'humus et certaines caractéristiques chimiques de l'horizon A.

(Jabiol B., Gégout J-C., Gadenne J., Weisse G., Pierrat J-C.)

Le traitement des données de la base EcoPlant a permis de chercher des relations entre formes d'humus et caractéristiques écologiques des stations. Il a été montré qu'à l'échelle de la France les formes d'humus sont extrêmement liées aux caractères chimiques des horizons A, et particulièrement pH, taux de saturation et rapport C/N. Elles s'ordonnent écologiquement en fonction de ces variables, des formes mors et dysmoders aux eumulls pour pH et S/T croissants et C/N décroissant. Les amphimulls s'inscrivent cependant mal dans cet ordonnancement écologique, justifiant leur non rattachement à la famille des mulls. Ces relations effacent, pour l'échantillon traité, l'influence éventuelle des facteurs climatiques et celle de l'essence. Les relations sont inchangées entre le Nord Ouest et le Nord est de la France. Chaque forme d'humus ne se distingue pas forcément statistiquement des formes voisines pour ces facteurs analytiques à cause d'une variabilité encore forte dont la source n'a pu être définie. L'analyse d'un sous échantillon a permis de montrer que la prise en compte de l'épaisseur des couches et de leur continuité n'améliore pas les relations, la prédiction des variables chimiques par la description des formes d'humus restant aléatoire. Les caractéristiques chimiques expliquent 50% de l'ordonnancement des placettes issu de ces variables descriptives.

Volet 2, objectif 2 : Etude approfondie du lien entre morphologie, biologie et fonctionnement des types d'humus

(Aubert M., Trap J., Brethes A., Jabiol B., Ponge J-F., Akpa-Vinceslas M., Margerie P., Hedde M., Chauvat M., Bureau F.)

Différents épisolums humifères développés sur des sols forestiers acides limono-sableux à limoneux et de pHeau variant de 3.7 à 5.2 dans l'horizon A ont été décrits au champs et prélevés afin d'estimer leurs capacités de minéralisation et de nitrification potentielles (CMP & CNP) au laboratoire. La gamme d'épisolum étudiée allait des mésomulls jusqu'aux dysmoders.

Les formes d'humus de type moder échantillonnées présentaient des CMP significativement supérieures à celle des mulls. Les moders ne différaient pas significativement entre eux tandis qu'au sein des mulls, paradoxalement, les mésomulls avaient les CMP les plus faibles. Ces résultats s'expliquent essentiellement par les fortes CMP des horizons O dans les moders tandis que celles des 5 premiers centimètres du solum étaient relativement faibles et sans différences significatives entre les

différentes formes d'humus. Concernant les CNP, aucune différence significative entre formes d'humus ne fut mise en évidence même si les organismes décomposeurs à l'origine du processus variaient entre les moders. Certains moders présentaient une nitrification d'origine fongique alors que pour d'autres elle était d'origine bactérienne.

En termes de morphologie de l'épisolum, ces différences fonctionnelles se traduisent par la présence de matière organique fine dans les horizons O. Le pourcentage de recouvrement des horizons OF et OH, l'épaisseur de l'horizon OH, le pourcentage de matière organique fine dans l'horizon OF, le pourcentage de boulettes fécales et de MO figurée dans l'horizon OH, ainsi que le pourcentage de composants végétaux blanchis dans les horizons OL_v et OF peuvent être considérés comme de bons indicateurs des CMP pour les épisolums échantillonnés. La présence ou l'absence d'un horizon OF_m à structure mycogène au sein des moder semble indiquer l'opposition, respectivement, nitrification fongique *versus* nitrification bactérienne.

En conclusion, l'étude a montré que la classification morphologique française des formes d'humus (AFES 1995; Jabiol et al. 1995) présentait réellement un caractère indicateur fonctionnel en terme de minéralisation de l'azote et que la prise en compte des caractéristiques fines de l'humus pouvait renseigner sur l'efficacité des processus ainsi que sur les organismes décomposeurs impliqués dans la nitrification.

AFES, 1995. Référentiel pédologique. INRA.

Jabiol, B., Brêthes, A., Ponge, J.-F., Toutain, F., Brun, J.-J., 1995. L'humus sous toutes ses formes. ENGREF, Nancy.

Estimation du potentiel stationnel en peuplement mélangé, irrégulier. Effets combinés du milieu, de la compétition et de la sylviculture

COORDINATEUR DU PROJET

Philippe Dreyfus

Participants au projet :

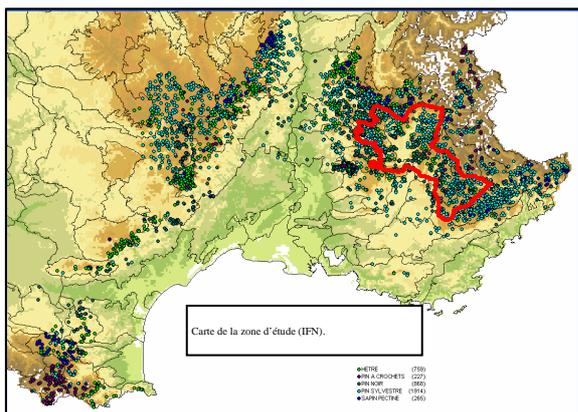
Florence Courdier (INRA Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes (UR 629)), Éric Bruno (IFN Écologie - Montpellier), Jean Ladier (ONF Direction Territoriale Méditerranée - Pôle Appui et Progrès Technique - Manosque)

Objectifs - Démarche de recherche

Ce projet contribue à répondre à l'un des points - intitulé « *Potentialité : éclaircir le lien station-production* » - de l'Appel à Propositions de Recherche « Typologie de stations forestières » d'ECOFOR (juin 2004). Cet APR fait notamment référence au besoin d'indicateurs de fertilité pour « *les peuplements irréguliers, mélangés, voire en milieu ouvert* ». L'objectif finalisé est de pouvoir prévoir la croissance des essences forestières pour une large gamme de conditions stationnelles et pour des types de peuplements très diversifiés, et de contribuer ainsi au choix d'essences objectifs. Nous avons étudié cette question dans le contexte de l'arrière-pays méditerranéen français, où les dynamiques forestières en cours tendent à accroître la surface et la diversité de peuplements que l'on qualifie d'« *hétérogènes* », soit du fait de leur caractère mélangé (retour du Hêtre et du Sapin dans des peuplements purs de Pins, notamment), soit à cause de leur stratification verticale ou de leur structure horizontale en mosaïque.

Compte tenu de la complexité de la question, le cas des peuplements « *homogènes* » (monospécifiques, équiennes, réguliers) a été utilisé comme situation de référence, considérant qu'ils sont, en quelque sorte, un cas particulier très simple de peuplement hétérogène. Les effets de divers types d'hétérogénéité, qui déterminent des conditions de compétition variées, peuvent ensuite être évalués par comparaison, à caractéristiques stationnelles égales.

Peuplements Homogènes : une situation de référence



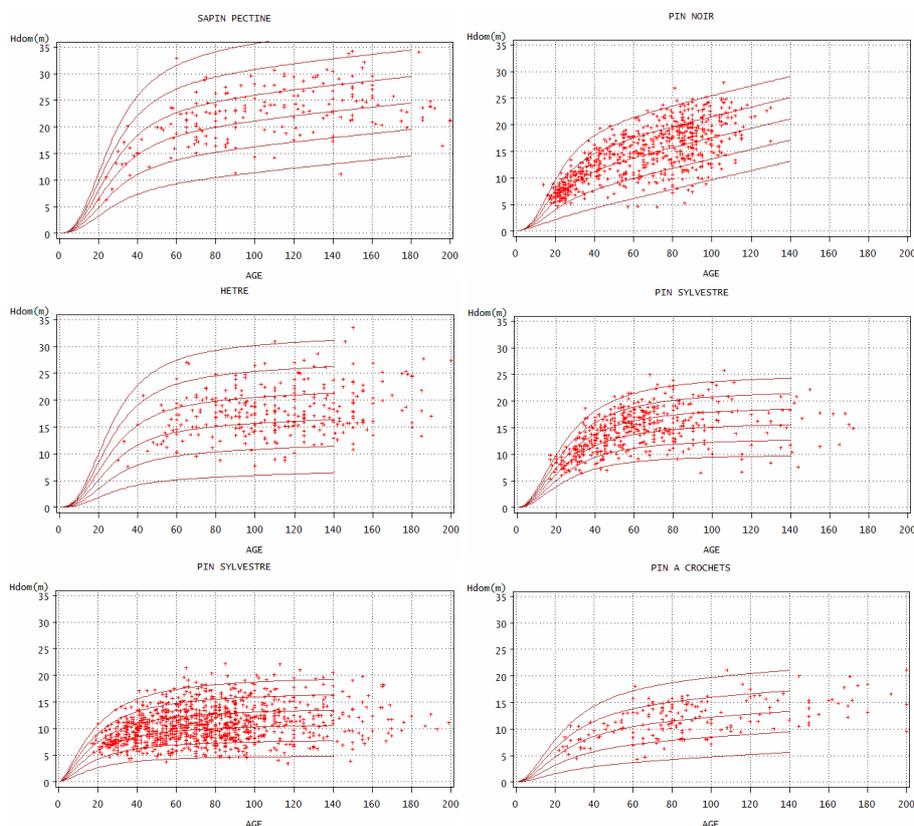
À partir de données de l'IFN couvrant 12 départements (Lozère, Gard, Hérault, Ardèche, Pyrénées-Orientales, Aude, Vaucluse, Var, Alpes-Maritimes, Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Drôme), pour des peuplements homogènes des 5 principales essences impliquées dans les évolutions dynamiques en cours dans l'arrière-pays méditerranéen (Hêtre, Sapin pectiné, Pin sylvestre, Pin noir et Pin à crochets), nous avons établi des relations entre hauteur dominante et âge en fonction du niveau de potentialité

stationnelle. Les faisceaux de courbes [Hdom, âge] obtenus comblent un manque pour ces espèces et cette grande région. Ils peuvent de plus servir de référence pour une comparaison avec diverses formes de peuplements hétérogènes.

Alors que de tels faisceaux sont classiquement obtenus par analyse de tiges d'arbres dominants, ils ont ici été construits à partir des nuages de points des placettes IFN. Pour pallier le manque d'information longitudinale (hauteurs successives d'un arbre ou accroissements), des familles de placettes ont été constituées à partir de leurs caractéristiques stationnelles ou floristiques (données IFN) ; ensemble, ces familles de point déterminent la forme du faisceau ajusté statistiquement pour l'essence considérée ; le niveau de fertilité stationnelle est repéré par une hauteur dominante à un âge de référence. Le faisceau obtenu *via* l'analyse phyto-écologique (É. Bruno, IFN) constitue une validation du faisceau fondé sur les variables écologiques. L'ajout d'une information climatique (base AURELHY de Météo-France) n'a pas amélioré sensiblement le faisceau fondé sur les données écologiques, mais ouvre des perspectives dans la prise en compte des changements climatiques.

Faisceaux obtenus : Hauteur dominante en fonction de l'âge total IFN.

N.B. : pour le Pin sylvestre : à gauche, sur substrat siliceux ; à droite, sur substrat calcaire.



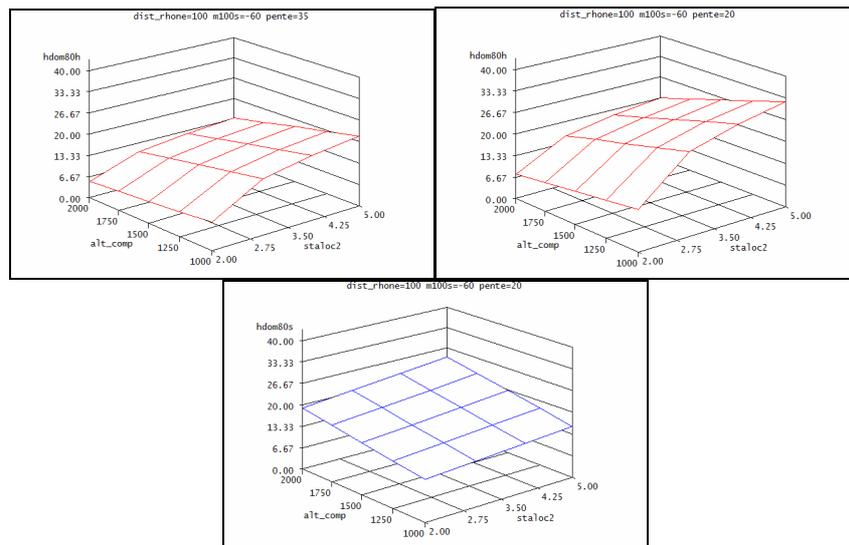
Les croix figurent les placettes IFN. Le faisceau de courbe correspond au modèle ajusté pour l'essence (et le type de substrat, le cas échéant) ; une série de valeurs du paramètre qui détermine la hauteur de la courbe, ont été choisies de manière à couvrir à peu près le même domaine que les placettes.

Le lien entre la hauteur dominante et les conditions stationnelles a été approfondi dans le cas d'une région plus petite (Préalpes sèches), sur laquelle a porté la suite du projet (peuplements hétérogènes). À partir de 138 placettes pour lesquelles la caractérisation stationnelle a été faite selon une méthode qui diffère de celle de l'IFN, notamment par la prise en compte de variables complémentaires établies à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (masques nord et sud, altitude compensée par le rayonnement ...), une relation a été établie entre, d'une part, la hauteur dominante à un âge de référence (fixé à 80 ans) en peuplement homogène et, d'autre part, les variables stationnelles les plus

significatives pour chacune des 5 essences. À partir de la note de bilan hydrique définie dans le catalogue des stations des Préalpes sèches¹, un indice synthétique continu exprimant la capacité de stockage du sol en eau a été élaboré ; il intègre le réservoir utile maximal du sol (fonction de la profondeur, de la charge en éléments grossiers et de la texture des différents horizons), une note de topographie locale (convexe : -1, neutre : 0, concave : 1) et la pente.

Les figures ci-dessous illustrent les relations obtenues, respectivement, pour le Hêtre et pour le Sapin pectiné.

Elles montrent notamment que l'altitude compensée joue sur le Hêtre et le Sapin en sens opposés, que le Sapin est moins sensible à la capacité de stockage du sol en eau (notée « staloc2 ») et que, selon les conditions stationnelles, le classement de ces deux essences peut s'inverser :



Hêtre, pente 20 degrés

Hêtre, pente 35 degrés

Sapin pectiné, pente 20 ou 35 degrés (mêmes

valeurs)

N.B. : uniquement pour un versant nord ; la valeur des autres variables explicatives (distance au Rhône, masque sud à 100 m) est fixée.

Peuplements Hétérogènes : la compétition modifie la croissance en hauteur des dominants, actuels ou futurs

Alors qu'en peuplement homogène, la croissance en hauteur des arbres dominants est à peu près indépendante de la compétition et reflète donc uniquement les caractéristiques de l'espèce et le potentiel stationnel, divers effets de la compétition sont notés en peuplements hétérogènes :

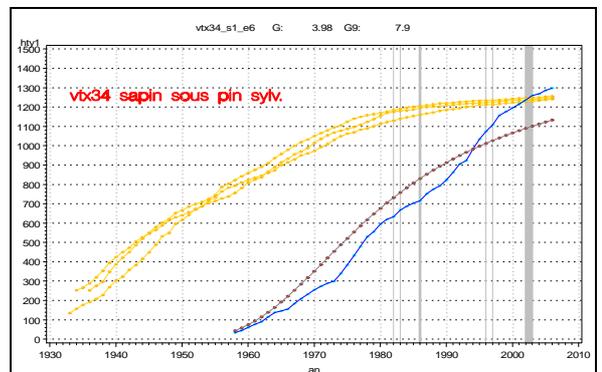
- la croissance en hauteur d'une régénération apparue sous un couvert (de la même espèce ou d'une autre) dépend des conditions de lumière et d'humidité sous ce couvert et peut donc varier fortement ; devenus à leur tour dominants (après coupe ou disparition naturelle et progressive du couvert) les anciens semis auront une hauteur différente de celle d'individus de la même espèce, sur la même station, qui auraient poussé en plein découvert ;
- même en peuplement monospécifique, équiennne, la croissance en hauteur dominante peut-être modifiée si la densité du peuplement est trop forte ou, - cas plus fréquent dans la région d'étude -, si le peuplement est plus ou moins ouvert, que ce soit à la suite d'interventions sylvicoles ou à cause d'une densité faible dès l'origine (peuplements lâches).

¹ Ladier J., 2004. Les stations forestières des Préalpes sèches : définition, répartition, dynamique, fertilité – ONF, Direction Territoriale Méditerranée – 124 pp.

Au cours de ce projet, nous avons étudié le cas de peuplements de Pin noir fortement éclaircis : les mesures confirment un effet négatif, plus ou moins transitoire, sur la croissance en hauteur ; ces données complètent des informations qui permettront de modéliser cet effet.

Dans le cas d'une régénération sous couvert - très fréquent dans le contexte forestier étudié -, on constate généralement un effet négatif de la strate supérieure sur la croissance en hauteur. Les données acquises dans ce projet sur des régénérations de Sapin ou de Hêtre arrivées à hauteur du couvert laissent penser que ce dernier peut également avoir un effet positif sur la croissance en hauteur du toit de la régénération, en tous cas pour ces deux essences réputées tolérantes à un certain ombrage et pour un couvert relativement clair de Pins. En effet, les cinétiques mesurées montrent un ralentissement de croissance lorsque les sapins dépassent le couvert, ou bien lorsqu'ils se trouvent dans des trouées fortement éclaircies à la suite d'une coupe. Cet effet du couvert sur la croissance en hauteur, apparemment contradictoire avec l'effet négatif cité plus haut, requiert, pour être entièrement modélisé, des informations complémentaires ; certaines viennent d'être obtenues dans le cadre d'un projet parallèle et vont être analysées en lien avec celles acquises ici.

Figure XXX : Exemple de reconstitution de croissance en hauteur d'un sapin (courbe bleue) ayant poussé sous une plantation de Pin sylvestre (cf. 3 courbes jaunes correspondant à des pins dominants du couvert). La courbe brune, prise comme référence, simule la croissance d'un semis de même âge, sur la même station, mais appartenant à un peuplement homogène (pur, équienne, régulier) de Sapin. On note que la croissance s'accélère jusqu'à rattraper et dépasser la référence, puis ralentit lorsque la hauteur approche et dépasse celle du toit du peuplement. Les repères verticaux correspondent à l'exploitation de deux coupes (1982-83 et 1996-97), à deux années particulières au plan climatique (1987, favorable, et 2003, à été particulièrement sec et chaud).



Comparaison de diverses formes de Peuplements Hétérogènes, à station équivalente

Pour ce faire, on doit se placer dans des conditions telles qu'un écart de croissance observé ne soit pas lié à des différences stationnelles. Comme les situations « hétérogènes » sont potentiellement très variées, il faudrait trouver tout une gamme de peuplements, à station équivalente, pour évaluer dans quelle mesure la nature et l'ampleur de l'hétérogénéité détermine l'amplitude de l'écart de hauteur ; et ceci pour chacune des 5 espèces étudiées.

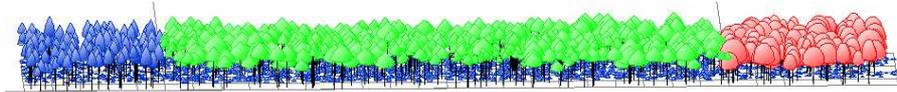
L'alternative utilisée ici a consisté à recourir au modèle de dynamique² établi par ailleurs pour les peuplements de l'arrière-pays méditerranéen, modèle dont les relations de croissance (en hauteur, en diamètre) intègrent l'espèce, l'âge individuel, un indice de fertilité stationnelle et l'intensité de la compétition (inter-spécifique, intra-spécifique, en tenant compte de la position respective de l'arbre et de ses compétiteurs en terme de hauteur dans le peuplement). Divers types de simulations (à l'aide du module Ventoux de la plate-forme Capsis, <http://capsis.free.fr>) peuvent être réalisées à partir de ce modèle et un plan de simulation est en cours de réflexion. Sa mise en œuvre complète interviendra dès que le modèle aura été amélioré sur la base des éléments indiqués précédemment (effet des faibles densités, effet favorable de certains couverts sur certaines espèces).

² « Gestion d'une Évolution Forestière Majeure de l'Arrière-Pays Méditerranéen : la maturation sylvigénétique des Pinèdes pionnières. Conséquences pour la Biodiversité sur le Site Pilote du Mont-Ventoux - Évolution sur 5 ans » - Convention ECOFOR N° 2003.29 (et avenant N° 2004.36), Rapport Scientifique Final - Ph. Dreyfus - décembre 2006

Exemple de comparaison entre Peuplements hétérogènes : régénération de Sapin, sous lui-même, sous Pin sylvestre et sous hêtre

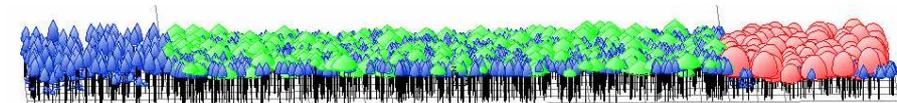
Futaies adultes monospécifiques générées à 60 ans, avec une surface terrière de 25 m²/ha, et un nombre de tiges de 500/ha, dans une situation stationnelle - fictive -, où les 3 essences ont les mêmes potentialités de croissance (Hdom80 = 17 m). Sous chacun de ces 3 peuplements, on simule une régénération initiale de Sapin, à raison de 20 semis de 30 cm de hauteur par are. L'évolution de ces peuplements est représentée par les diagrammes ci-dessous :

Situation initiale :



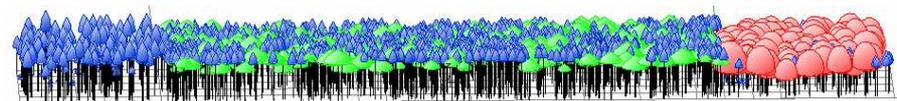
... avec une jeune régénération de sapin sous 3 types de couvert.

À + 60 ans :

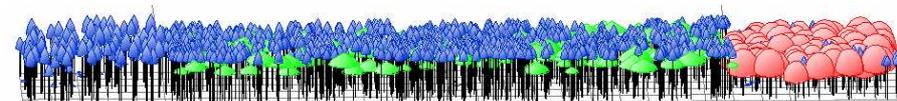


... on note que la régénération de Sapin, plus jeune, donc à croissance plus rapide que celle des arbres du couvert, a grandi (N.B. : on n'a pas simulé de nouvelle régénération pour bien visualiser le devenir de celle qui date de l'initialisation) jusqu'au point de rivaliser en hauteur avec le couvert de Pin sylvestre (à couvert relativement lumineux) mais pas encore avec le couvert sombre de Sapin ou de Hêtre.

À + 110 ans :

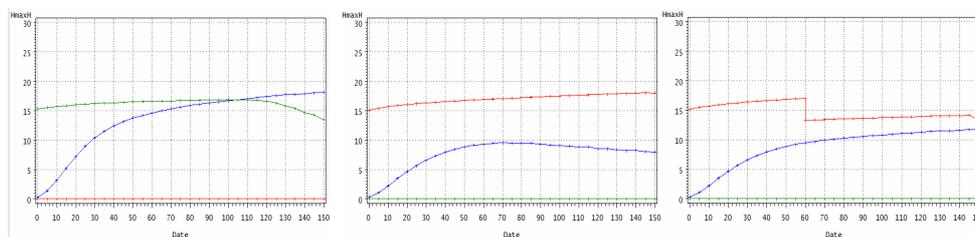


À + 150 ans :



Après 110 ans, le Sapin rattrape le Pin sylvestre, en hauteur ; après 150 ans, il l'a nettement dépassé. Par contre, sous couvert de Hêtre ou Sapin, la plupart des sapins issus de la régénération initiale n'arrivent pas à rejoindre ce couvert.

Les graphiques ci-dessous représentent l'évolution de la hauteur du Sapin (courbe bleue) sous Pin sylvestre (courbe verte) ou sous Hêtre (courbe rouge). La régénération initiale de Sapin finit par rattraper puis supplanter le Pin (à gauche) mais pas le Hêtre (au milieu) ; toutefois, la figure de droite, qui correspond à un cas où une coupe est intervenue après 60 ans dans le couvert de Hêtre, indique que la sylviculture peut modifier l'équilibre entre espèces (notamment si on répète ce genre d'intervention) :



Conclusion - Perspectives

• Sur la base de jeux de données existants et nouveaux, ce projet a abouti à des connaissances permettant de faire la part de l'effet stationnel de l'effet de la compétition (modulée par la sylviculture) en utilisant une approche qui fait appel simultanément à des compétences en écologie, en dendrométrie, en modélisation. Ces connaissances contribuent à améliorer le diagnostic, c'est-à-dire l'évaluation du potentiel stationnel, et les pronostics, c'est-à-dire les prévisions d'évolution (en structure et composition) des peuplements hétérogènes en fonction du milieu et de la sylviculture. La

conjonction avec d'autres projets en cours et la poursuite de l'analyse des informations rassemblées dans le cadre du présent projet déboucheront à court terme sur des outils dont les gestionnaires forestiers pourront tirer bénéfice pour la gestion des dynamiques forestières dans l'arrière-pays méditerranéen.

- Outre cette meilleure compréhension du lien entre station et croissance, ce travail a contribué à la mise au point d'indices synthétiques continus (variable quantifiant la capacité de stockage de l'eau dans le sol, notamment) et a permis de confirmer ou de préciser l'importance de certaines variables topographiques (masque local, notamment) accessibles *via* un SIG et un MNT.
- Ce projet a également permis d'aborder sommairement l'étude du lien entre hétérogénéité stationnelle et hétérogénéité du peuplement ; la poursuite dans cette voie nous semble devoir aller de pair avec la mise au point d'une méthode de description stationnelle capable de rendre compte de la variabilité locale (intra-parcelle) de la profondeur du sol.
- L'évolution des conditions stationnelles liée aux changements climatiques en cours pourrait être prise en compte grâce à l'introduction de variables climatiques explicites (première ébauche dans le cadre de ce projet ; un autre projet portant spécifiquement sur le lien entre étages de végétation et paramètres climatiques est en cours d'achèvement). Les risques de dépérissement ne peuvent cependant pas être liés strictement aux mauvaises conditions de croissance ; ils dépendent en outre de variations temporelles interannuelles (notamment épisodes extrêmes) des conditions stationnelles qui ne sont pas prises en compte ici.

Recherche d'indicateurs du fonctionnement racinaire pour affiner la relation station-production : application à la chênaie de Tronçais

COORDINATEUR DU PROJET

Jean Garbaye, INRA de Nancy, Champenoux

Contexte et objectifs

Les études station-production ont jusqu'alors surtout ciblé des indicateurs qui relèvent soit des ressources (réserve hydrique du sol, éléments assimilables) soit des manifestations intermédiaires de la mobilité de ces ressources (analyses foliaires, végétation, type d'humus). Une approche alternative mettrait au centre de la relation l'interface sol-arbre directement responsable de la mobilisation et de l'absorption des ressources, c'est-à-dire les racines. Or, les essences forestières sociales de nos forêts européennes mobilisent et absorbent l'eau et les éléments nutritifs du sol par l'intermédiaire des champignons symbiotiques qui forment les ectomycorhizes. Ce sont donc ces champignons qui contrôlent les capacités de mobilisation et d'absorption des ressources hydrominérales par les arbres, et leur diversité est très grande. Les progrès récents de la technologie permettent désormais d'analyser avec rapidité et précision la diversité fonctionnelle du complexe symbiotique. Toutes les conditions sont donc réunies pour que l'on puisse envisager sérieusement l'utilisation des ectomycorhizes comme indicateurs de la capacité d'un peuplement à utiliser les ressources du sol.

Par ailleurs, dans les classes de fertilité intermédiaire des catalogues de stations actuellement disponibles, la liaison station-production est souvent trop faible pour une application vraiment satisfaisante dans la pratique. Parmi les nombreux facteurs responsables il en est un dont on commence seulement à percevoir l'importance considérable : l'utilisation passée (même lointaine) des sols par l'Homme avant la stabilisation relative (et probablement temporaire) de l'écosystème forestier actuel. Les modifications complexes de la structure et de la chimie des sols induites par l'agriculture ont très probablement entraîné des modifications à long terme de la fertilité des sites et de la production des peuplements forestiers actuels.

L'hypothèse de travail qui sous-tendait le projet est que, à l'intérieur d'un même type de station défini par les critères usuels, le résidu de la liaison entre les facteurs « explicatifs » (par exemple le sol) et la croissance des arbres est dû en partie à la structure du cortège fongique symbiotique. Nous avons éprouvé cette hypothèse dans un contexte d'utilisation ancienne des sols : douze sites gallo-romains dans la chênaie de Tronçais (Allier) ont fait l'objet d'analyses de sol, de mesures dendrométriques et de caractérisation de la structure spécifique et fonctionnelle des communautés d'ectomycorhizes, en comparant des placettes proches et éloignées de chaque foyer d'occupation gallo-romaine.

Résultats

Nous avons d'abord constaté que la croissance des chênes était surtout déterminée par le site, indépendamment de l'occupation humaine passée, alors qu'au contraire, les propriétés chimiques du sol sont avant tout déterminées par cette occupation. La classe de fertilité des chênes est donc essentiellement déterminée par des facteurs autres que les propriétés chimiques des sols qui ont été

déterminées ici. Nous avons donc ensuite recherché si les différences de statut symbiotique des racines contribuaient à expliquer la part des variations de croissance des chênes constatée entre les zones intérieures et extérieures des sites.

Il est apparu que l'enrichissement du sol en N et P provoqué par les activités humaines passées retentit encore, 18 siècles plus tard, sur la composition en espèces du cortège de champignons symbiotiques associés aux racines des chênes, et plus particulièrement lorsque cet enrichissement s'accompagne d'une meilleure croissance actuelle des chênes. Afin de tenter de comprendre les mécanismes en jeu, nous avons formulé une hypothèse trophique : les communautés fongiques symbiotiques des zones intérieures et extérieures diffèrent dans leur capacité à mobiliser les ressources du sol en azote et en phosphore. Pour cela, nous avons déterminé les profils d'activité enzymatique des communautés d'ectomycorhizes et des morphotypes dominants.

Les résultats suggèrent que la plus forte croissance des chênes sur certains sites gallo-romains est due à une meilleure efficacité des racines pour mobiliser l'azote, et à un moindre degré le phosphore, à partir de la matière organique fraîche. Nous avons donc voulu savoir quels étaient les champignons plus particulièrement responsables de ces fonctions essentielles pour la nutrition des arbres, et trouvé que les différentes espèces fongiques du cortège ectomycorhizien des chênes contribuaient différemment à l'activité enzymatique globale de la communauté, et répondaient différemment à l'occupation gallo-romaine.

Conclusions

Du point de vue des avancées scientifiques, ce travail a contribué à apporter un éclairage nouveau sur plusieurs aspects de l'écologie des communautés d'ectomycorhizes et leur rôle dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers : adaptation à la station et aux perturbations du sol, même très anciennes, diversité et complémentarité fonctionnelle des espèces au sein de la communauté.

Pour ce qui est des acquis en termes de transfert, le projet initial annonçait trois objectifs finalisés : (1) utiliser en routine la valeur indicatrice des champignons ectomycorhiziens pour affiner la relation station-production, (2) détecter les facteurs de l'environnement et les caractéristiques des racines absorbantes des arbres expliquant les anomalies constatées dans certains catalogues de stations actuels, et (3) évaluer l'impact des perturbations anthropiques passées sur la fertilité et les indicateurs stationnels actuels.

Le premier de ces objectifs n'a pas été complètement atteint dans le cadre du projet : s'il est bien démontré que certains symbiotes ont valeur indicatrice des perturbations locales de la fertilité du sol (ce qui répond au deuxième objectif), la technique moléculaire rapide pour les détecter est encore en cours de validation. Le troisième objectif a été pleinement réalisé : l'usage passé des sols, même très ancien, retentit encore de façon significative non seulement sur leurs propriétés mais aussi sur la façon dont les peuplements forestiers actuels y répondent, en particulier par le biais du recrutement de leurs associés symbiotiques.

Ces nouvelles connaissances montrent les limites de la seule prise en compte des caractéristiques physico-chimiques stationnelles pour expliquer la croissance des arbres : la plasticité symbiotique de ces derniers leur permet de s'adapter aux modifications de l'environnement, mais de façon difficile à prévoir dans l'état actuel des connaissances. C'est peut-être ce qui explique l'imprécision de certains catalogues de stations, ou du moins la difficulté à les mettre en œuvre dans des études de liaison station-production.

Quelles attentes en forêt privée concernant la « typologie des stations forestières » ?

Représentations et usages - Conditions et moyens d'une meilleure adéquation de l'outil

COORDINATEUR DU PROJET

Clotilde Giry (IDF-CNPPF)

Contexte et objectifs

Qui en forêt privée connaît la démarche « typologie des stations » et ses outils? Comment est-elle perçue? Quels usages en fait-on? Quelles améliorations et quels développements pourraient être envisagés?

Pour répondre à ces questions, un programme de 18 mois, financé par le GIP Ecofor sur 2005 et 2006, a été coordonné par l'IDF, et conduit par deux équipes de spécialistes en sciences sociales, dont les approches ont été mises en œuvre et étroitement liées sur l'ensemble du dispositif, ce qui a permis de croiser les analyses, et de renforcer la validation des résultats.

Deux rapports très complets ont été élaborés, qui ont permis de dégager et valider des lignes de force communes aux deux analyses, puis de mettre en évidence les conditions, principes et moyens d'amélioration de la démarche typologie des stations.

Les constats communs aux deux analyses

1 -La typologie des stations est perçue de façon globalement positive par toutes les personnes auditionnées, quelles que soient les catégories auxquelles elles appartiennent (gestionnaires et techniciens, représentants de l'administration, experts, propriétaires).

Dans sa définition et ses principes, elle est plutôt en phase avec la culture, les savoir-faire et les valeurs propres au monde forestier

=> **MAIS** elle est comprise et investie très différemment selon ces catégories, dès qu'on passe au stade de son application: une ligne de partage démarque alors fortement les concepteurs et experts, des gestionnaires et propriétaires; et un écart s'instaure entre le plan des principes et de l'identité, favorables à la démarche, et le plan des pratiques, qui l'intègrent mal ou fort peu.

2 -On reconnaît à la typologie plusieurs fonctions et usages possibles, et souhaitables – et il y a même consensus sur ce fait

Ces fonctions correspondent à toute une série d'enjeux, qui se sont élargis et diversifiés au fil du temps: réussir les boisements et reboisements, grâce à un choix d'essences adaptées; garantir les

« bonnes pratiques » de gestion sylvicole et environnementale, et s'assurer de leur durabilité (anticipation des risques liés au changements globaux, optimisation des approvisionnements face à des marchés qui évoluent); enfin, dans une perspective de gestion des territoires, permettre le dialogue multi-acteurs et aider à l'élaboration de projets.

=> **MAIS** seules ou presque les fonctions « historiques » (adaptation essences/stations) sont utilisées – modestement et dans certaines conditions

=> **MAIS** ces dernières apparaissent en relatif décalage temporel et fonctionnel par rapport aux enjeux perçus comme fondamentaux par les acteurs de terrain (questions sylvicoles concrètes, évolutions du marché et de la filière, changement climatique, nouvelles attentes sociales, incertitudes sur la politique forestière et le modèle de développement) ; et ce, dans un contexte où les contraintes économiques et réglementaires sont ressenties de plus en plus pesantes

Or ce sont clairement ces enjeux, et la façon dont les acteurs les perçoivent et les intègrent dans leurs stratégies d'action, qui déterminent leur plus ou moins grand intérêt pour l'approche stationnelle, et rendent compte de la relative sous-utilisation des guides et catalogues - plus que les qualités intrinsèques des documents.

3 -En ce sens, les deux études valident à leur manière le fait que la logique « d'offre » de typologie des stations (à laquelle s'apparentent les démarches de relance dans les régions pilote), a un impact positif sur certaines catégories d'utilisateurs – personnel technique majoritairement et certains gestionnaires – qu'elle a « professionnalisé » avec un relatif succès.

=> **MAIS** elles mettent en évidence les limites de cette logique, qui – même en se dotant d'un « mieux-disant » pédagogique et de communication – reste fondée sur l'adaptation et la simplification d'une approche « expert », qui n'a pas à l'origine et par nature été conçue par rapport aux besoins de l'ensemble des utilisateurs (ces besoins ayant en outre évolué avec le temps).

Quelles pourraient être les conditions d'amélioration ?

Partant de ces constats communs, les études pointent de façon commune 3 conditions d'amélioration :

1 -Conforter la démarche de relance et les outils qu'elle a développés

Tous les maître-mots mis en évidence dans le rapport de Bénédicte Boisseau (Cemagref – 1999) aussi bien que dans les conclusions des rencontres typologie de Dijon (2003) ou encore le récent « Guide-âne » de l'IFN (2006), sont plus que jamais d'actualité: clarté et simplification des documents, pédagogie, formation, animation, accompagnement systématique des utilisateurs, appui sur des personnes relais et dynamique de « contamination positive », implication des utilisateurs dès l'amont et évaluation des actions.

Ce sont eux qui ont guidé la démarche de relance dans les 2 régions pilotes, avec un indéniable succès auprès des personnels techniques (cf l'enquête menée en Champagne-Ardenne, qui démontre une meilleure appropriation des outils et l'émergence de nouvelles demandes).

Certaines pistes d'action – qui pour partie ont été déjà évoquées par ces mêmes sources – seraient également à développer: mise en place de leviers incitatifs, financiers et/ou réglementaires pour les

prescripteurs et acteurs économiques; harmonisation et mise en cohérence de la typologie des stations à l'échelle nationale, voire européenne ; instauration d'une dynamique d'émulation entre Régions.

MAIS AUSSI ET SURTOUT ...

Si l'on veut accroître de façon sensible l'usage des principes et outils de la typologie des stations par les gestionnaires et propriétaires, et leur diffusion élargie auprès d'autres publics (décideurs et politiques, associations, étudiants et enseignants),

2 - Replacer la typologie des stations au cœur des préoccupations et des enjeux perçus par les gestionnaires et propriétaires,

- ⇒ apporter des réponses à leurs questions pratiques (productivité, sylviculture, mais aussi multifonctionnalité, changement climatique ...)
- ⇒ n'en faire ni un dogme ou un outil normatif - selon une approche monolithique et exclusive, ni une affaire d'experts

En d'autres termes, il conviendrait – pour ces catégories – d'inverser la perspective qui a prévalu jusqu'alors et, soit dit de façon un peu schématique, de rapprocher la typologie des utilisateurs, et non plus seulement les utilisateurs de la typologie. En développant de nouvelles approches permettant que leurs demandes soient mieux servies grâce à la typologie (et en des termes qui correspondent à leurs questions); et non plus seulement en tentant de les convaincre des bienfaits de la démarche.

3 – Elargir ses champs et ses usages pour l'aide à la décision, la conduite de projets, la médiation et le dialogue – y compris hors la sphère forestière – au plan individuel et collectif

L'un des participants du séminaire de Dijon l'avait affirmé : « la typologie est un outil de base de caractérisation des milieux, elle doit devenir un outil d'aide à la décision pour différentes catégories d'usagers, à différentes échelles ».

Il s'agirait d'élargir autant que faire se peut la fonction « de base » de la typologie (c.a.d. adaptation essences/station) à celles qui lui sont potentiellement reconnues, dans le domaine des « bonnes pratiques » de gestion sylvicole et environnementale, de l'anticipation des risques, de la gestion collective des territoires – sachant toutefois que la typologie ne peut jouer le rôle du couteau suisse, et qu'il convient de rester dans les limites pertinentes de l'outil, et dans un parti pris de modestie.

Sachant également que tout projet individuel et collectif est singulier (contexte , contraintes, désirs et compétences, profils d'identité...), et évolutif.

En ce sens, une réflexion est à mener quant à l'intégration modulée de l'approche stationnelle dans des outils et/ou des démarches plus globales et/ou plus spécifiques selon le problème posé, et sur son articulation avec d'autres approches (typologie des peuplements par exemple)

Principes et moyens d'amélioration

Concrètement, les moyens évoqués sont de trois ordres.

1 - Adapter et différencier l'approche selon les besoins, c'est à dire:

- ⇒ approfondir et systématiser les études de besoins, en fonction du type d'usagers (l'étude sur les profils d'identité – cf bibliographie) donne à cet égard des clés qui pourraient être utiles dans l'élaboration d'outils de sensibilisation)

- ⇒ différencier les « produits » et outils de l'approche typologie selon ces besoins (l'idée d'aborder la typologie à travers des thèmes porteurs relève de cette logique)
- ⇒ doser leur application également en fonction des besoins, et des niveaux d'expertise;
- ⇒ les concevoir de façon évolutive

Les exemples et idées ci-après, vont dans ce sens.

Pour les personnels techniques et les gestionnaires :

- quelques-uns des guides récents associent typologie des stations et itinéraires sylvicoles (moyenne-Vilaine, Picardie ; guide des sylvicultures de montagnes ...); développer de tels guides qui lient unités stationnelles, orientations sylvicoles et conseils de gestion en lien avec divers enjeux (production, écologie, chasse, accueil du public) serait une avancée intéressante
- un module de e-formation sur l'approche stationnelle est en cours d'élaboration sur le site intranet de la forêt privée, qui intègre également orientations sylvicoles et conseils de gestion

Pour les propriétaires :

La notion de « projet » (en cours ou en devenir) semble essentielle pour adapter la démarche station-guide du choix des essences au vécu des propriétaires forestiers et à ce qui a du sens pour eux.

Ces projets sont très divers de nature et d'envergure: liés parfois à une démarche administrative (PSG, certification), ou à la réflexion du propriétaire forestier qui souhaite intégrer à la fois la situation de sa forêt et son contexte spécifique, ses propres désirs et compétences ainsi que ses contraintes personnelles, ils peuvent être envisagés individuellement (transmettre ma forêt en bon état, produire du bois de chauffe, produire du bois d'œuvre pour la filière..., ou encore constituer un arboretum, réorienter ma forêt en la diversifiant), ou collectivement – en général à l'échelon local, qui a un sens pour les propriétaires forestiers (promouvoir une filière locale de bois de chauffage ou de bois d'ébénisterie ou de second œuvre pour la construction de chalets; constituer un parc loisirs et nature; faire un domaine de chasse individuel ou collectif, protéger des espèces, des sources; plus simplement, remettre en ordre et entretenir la forêt, faire des éclaircies avec d'autres propriétaires voisins ; mutualiser des moyens, créer de meilleures conditions d'exploitation, profiter d'un encadrement, de conseils ...)

Il paraît dès lors important de développer des outils qui permettent aux propriétaires de construire et de piloter leur projet – soit individuellement, ou en relation avec des appuis techniques, ou en combinant les deux démarches, et éventuellement en lien avec des projets collectifs locaux.

Sachant que l'offre d'information et de conseil provenant des organismes de développement est dans l'ensemble plutôt thématique (l'instruction du PSG fournissant toutefois un occasion d'offrir une prestation intégrée)

Trois options sont possibles :

- une option « élémentaire », qui consisterait à proposer un classeur modulaire personnalisé (« entretenir et gérer ma forêt »)

Ce classeur intégrerait approche station, itinéraires sylvicoles, données environnementales, toutes ces informations pouvant être également traitées sur un site Internet ou/et sur un outil mobile numérique de type PDA - avec GPS pour la cartographie, voir infra).

- un outil d'analyse, de diagnostic et d'aide à la décision

La démarche station-guide serait alors une ressource scientifique et technique de base parmi d'autres ressources, intégrée à une démarche de conception et de conduite de projet

Cet outil intégrerait les caractéristiques de la forêt locale et les données d'environnement (réchauffement, biodiversité), irait du terrain au modèle, permettrait le dialogue entre les propriétaires forestiers, et entre propriétaires et experts-conseillers.

- une démarche globale de conception et conduite de projet

la démarche station-guide deviendrait la ressource principale pour construire et réaliser un projet, en intégrant les éléments suivants: prise en compte du profil du propriétaire et de ses objectifs; diagnostic des potentialités naturelles et de la situation des parcelles considérées; prise en compte de l'environnement socio-économique (filiale locale, développement local, groupement ...) et naturel (variations climatiques, microclimat); définition du projet, plan d'actions (échancier, moyens à mettre en œuvre, indicateurs de réalisation)

Notons que ces deux dernières options pourraient à notre sens être adaptées aux attentes des collectivités territoriales et des associations.

Pour le grand public

Un outil de diagnostic et de connaissance de la forêt, utilisable par tous, avec une version ludique, qui permettrait au joueur de gérer une forêt selon un profil et des objectifs spécifiques, avec des atouts et contraintes d'environnement, et des événements exceptionnels - tempêtes, gibier, parasites ... (exemple de SIM-CITY, qui a connu un grand succès, sur ce même principe appliqué à la gestion d'une ville)

2 – Développer d'autres supports et d'autres modes d'appropriation que les outils « classiques » (guides et brochures), en exploitant Internet et les nouvelles technologies :

Ces nouvelles technologies (internet, PDA, GPS) sont des supports favorablement perçus et recherchés par bon nombre des personnes auditionnées, quelle que soit leur catégorie: cartographie, arboretum virtuel, herbier virtuel, reconnaissance logique des stations ... sont autant de pistes évoquées dans les entretiens.

L'idée d'un centre de ressources dédiées, avec différents volets, serait à réfléchir :

- ⇒ ressources liées à chaque catégorie d'acteurs (propriétaires, techniciens, experts, décideurs, élus...), et à des « bouquets » de projets associés
- ⇒ ressources liées aux évolutions globales (climat, filières, normes, durabilité)
- ⇒ forums, FAQ, échanges d'expériences, blogs
- ⇒ entrées régionales, cartographie
- ⇒ entrée grand public (botanique, pédologie, essences)

3 – Développer via ces supports d'autres modalités de coopération et de communication

Une demande assez forte semble émerger pour des modes de communication et de coopération transversaux, selon une logique « peer to peer », entre scientifiques d'une part, forestiers de terrain d'autre part, et aussi entre ces deux catégories, et entre Régions.

Compte tenu du désengagement relatif de l'Etat concernant les dispositifs de soutien institutionnels et financiers à la typologie des stations, la diffusion de la « culture » typologie des stations pourrait s'appuyer beaucoup plus sur la collecte et l'échange d'expériences et de bonnes pratiques entre différentes catégories d'acteurs (cf notamment l'idée développée dans le guide-âne de l'IFN, de

constituer une base de données « stations » permettant de recueillir les données sylvicoles et l'expertise des forestiers de terrain, station par station).

Les modalités de l'enquête

Le comité scientifique du programme avait retenu la Région Rhône-Alpes comme unique région d'étude, avec la forêt privée comme cible essentielle.

Compte tenu du cadrage budgétaire et des objectifs du programme, l'enquête ayant servi les approches des deux équipes a été une enquête qualitative, menée sur la base d'un panel jugé représentatif et validé par le comité de pilotage.

Ce panel comprenait 57 personnes, qui ont été interviewées pendant environ 2 heures chacune, et que les équipes se sont réparties de la manière suivante :

- 13 personnes (8 ISP + 5 CNRS) ont été rencontrées en première phase, au titre de leur participation « historique » au développement de la démarche typologie des stations, et/ou au regard de leur expertise en ce domaine
- 44 personnes ont été rencontrées en Région Rhône-Alpes (Nord-Ardèche, Ardèche, Loire, Rhône et Haute-Savoie) ; dont 24 par l'ISP, parmi divers acteurs régionaux de l'appareil administratif et de développement, et 20 par le CNRS, essentiellement des propriétaires forestiers

Les résultats présentés doivent donc être replacés dans les limites de la Région d'enquête, et dans celles inhérentes au caractère qualitatif de la méthode – qui permet cependant de formuler, à dire d'experts – des hypothèses d'analyse suffisamment fines au regard des objectifs impartis à l'étude (qu'une enquête quantitative sur un échantillon plus large pourrait permettre de valider de façon plus définitive).

Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques.

COORDINATEURS DU PROJET

François Lebourgeois (AgroParisTech)

Catherine Cluzeau (IFN)

Participants au projet : Piedallu C., Gégout J.C., Seynave I., Vepierre R. (LERFOB – AgroParisTech-ENGREF – Nancy), Cluzeau C., Nédeltcheva T., Bruno E., (IFN), Badeau, V. (EEF – INRA – Nancy)

Travaux réalisés par l'IFN-INRA

L'Inventaire forestier national (IFN) recueille depuis 1992 sur ses points d'inventaire des données phytoécologiques, en complément des données dendrométriques, dans le but de décrire les caractéristiques stationnelles des peuplements forestiers. Il dispose actuellement de plus de 100 000 relevés répartis sur tout le territoire national.

Cependant, les données recueillies sur le terrain ne permettent pas toujours de caractériser de façon complète la topographie et le climat local, en particulier dans les zones de montagne. C'est pourquoi nous avons travaillé dans ce projet sur le calcul d'indices topographiques à partir d'un modèle numérique de terrain et sur le calcul du rayonnement solaire direct à l'échelle du territoire national selon différentes méthodes. Dans une deuxième étape, ces indices ont été utilisés pour définir les limites des étages de végétation dans la région des Alpes du nord. Dans les études de typologie des stations forestières en région montagneuse, les étages de végétation sont une des entrées principales des clefs de détermination.

Les valeurs d'altitude, de pente et d'exposition relevées au niveau des points IFN ont été comparées aux valeurs extraites du MNT au pas de 50 m de l'IGN. Les situations topographiques notées sur le terrain par l'IFN ont été comparées aux valeurs données par le modèle Positopo développé par le Lerfob. Ces comparaisons ont été effectuées dans la région Rhône Alpe. Les valeurs d'altitude et d'exposition extraites du MNT sont très proches des valeurs relevées sur le terrain, avec néanmoins une réserve pour l'exposition. Par contre, la pente mesurée directement sur le terrain rend mieux compte des conditions locales, or ce sont celles qui agissent sur les espèces végétales. Il en est de même de la position topographique qui pourrait cependant être améliorée, dans certaines situations difficiles à décrire directement depuis la placette d'inventaire, en complétant l'observation de terrain par les informations données par le modèle Positopo du Lerfob.

Le rayonnement solaire a été calculé sous SIG à partir d'un modèle topographique existant sur le marché (Solar Analyst) et comparé avec les modèles Helios (développé par le Lerfob) et Satmos (données satellitales de Meteosat). Les différences entre ces 3 modèles varient dans le temps et dans

l'espace. D'une manière générale, les valeurs de radiation globale issues de Solar Analyst sont les plus faibles. Les valeurs de rayonnement des 3 modèles sont plus proches pendant la période de végétation. Nos résultats montrent que la prise en compte de la topographie, de la latitude, mais aussi de l'albédo est nécessaire pour comprendre la répartition du rayonnement à grande échelle. Une solution à envisager pourrait être le couplage d'un modèle topographique comme Hélios avec un modèle satellital comme Satmos.

Le travail de définition des étages de végétation à partir des indices topoclimatiques s'est appuyé sur une étude précédemment réalisée dans le cadre du programme national de la typologie des stations forestières de la DGFAR. Nous sommes repartis de la classification de plus de 3000 points IFN selon 3 étages différents pour établir un modèle prédictif à partir d'une analyse discriminante. Le meilleur résultat a été obtenu avec le modèle combinant l'altitude, le rayonnement et la latitude. Afin de le valider, ce modèle devra être testé sur l'ensemble des Alpes, ce qui n'a pas pu être fait durant le projet.

Ce projet a permis à l'IFN de bénéficier des apports de l'INRA et du Lerfob en matière de spatialisation du rayonnement solaire et de calculs d'indices topographiques sous SIG. On peut d'ores et déjà envisager de futures collaborations sur le calcul et la spatialisation du rayonnement solaire en travaillant sur le couplage des modèles Satmos et Hélios ou encore sur l'amélioration de l'évaluation de la situation topographique en approfondissant l'étude comparée des observations Ifn et du modèle Positopo, encore en développement.

Travaux réalisés par le LERFOB – AgroParisTech-ENGREF – Nancy

La modélisation de la distribution ou de la productivité des espèces nécessite l'utilisation de variables écologiques qui souvent ne peuvent être relevées sur le terrain, cette opération étant trop complexe ou trop coûteuse. Les Systèmes d'Informations Géographiques, couplés à l'usage des modèles numériques de terrain, permettent d'estimer des facteurs écologiques en des lieux où ils n'ont jamais été mesurés, grâce à la réalisation de modèles spatialisés fournissant une information en tout point du territoire. L'étude des relations entre les espèces et les facteurs du milieu nécessite de travailler sur de larges emprises, afin de prendre en compte le plus largement possible le gradient écologique qui conditionne la distribution des espèces. Il est également nécessaire d'avoir une approche la plus fine possible, afin de prendre en compte l'effet de la topographie qui est un déterminant majeur à l'échelle locale. L'objectif de ce travail est donc de créer un certain nombre d'indices spatialisés caractérisant le bioclimat et étant à la fois valides à l'échelle de la France entière et à l'échelle la plus locale possible.

Dans un premier temps un modèle de rayonnement solaire est programmé sous le logiciel ArcGis, prenant en compte les effets liés à la topographie et les modulations à large échelle dues aux variations de nébulosité et de latitude. Le rayonnement a été cartographié pour la France entière au pas de 50 mètres pour chaque mois de l'année. La sensibilité du modèle a été analysée à différentes échelles montrant l'importance de chacune des composantes du modèle selon l'échelle. Sa validation sur un jeu de données indépendant montre une bonne corrélation avec les postes de Météo France (R^2 0.78 sur les valeurs annuelles, 0.88 en hiver). La capacité du modèle Helios à améliorer les modèles de distribution a été démontrée sur *Quercus pubescens*, *Acer pseudoplatanus*, et *Abies alba*. Une comparaison avec des estimateurs plus simples dérivés des calculs de pente ou d'exposition montre que les modèles radiatifs prenant en compte la nébulosité sont de loin les plus aptes à simuler le rayonnement solaire et à améliorer les modèles de distribution. Des ETP ont été calculées selon les méthodes de Thornthwaite, Hargreaves et Turc, cette dernière méthode intégrant le rayonnement calculé avec Helios. La comparaison de ces méthodes semble montrer que l'ETP Hargreaves est la plus proche de la mesure sur zone plate, mais que l'ETP Turc possède la plus forte capacité à prédire la distribution de la végétation du fait qu'elle prend en compte de la topographie.

Le calcul des bilans hydriques nécessite la prise en compte de la réserve utile maximale des sols (RUM). Nous avons élaboré une méthode permettant sa cartographie à partir de plus de 100000 relevés écologiques de IFN. Pour cela nous avons testé des classes de pédotransfert élaborées par différents auteurs, puis nous avons comparé diverses méthodes de prise en compte de la charge en cailloux. Les résultats ont été étalonnés sur des estimations de fertilité de trois essences, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, et *Quercus petraea*. Les résultats entre ces trois essences concordent pour désigner la meilleure méthode de calcul, qui a servi à la spatialisation des RUM. Des tests ont permis d'identifier la meilleure résolution de la carte, une taille de pixel de 50 mètres de coté ayant été choisi. L'étude multiéchelle des relations entre la carte des RUM et les indices de fertilité des trois essences démontre l'indépendance du pouvoir prédictif de la carte en fonction de l'échelle. La carte des RUM, combinée aux ETP Turc, a permis le calcul du bilan hydrique pour chaque mois de l'année et la spatialisation des variables qui en découlent sur la France entière.

Les différents indices calculés au cours de cette étude ont été comparés aux axes d'une AFC réalisée sur plus de 16000 placettes des bases EcoPlant et SOPHY, répartis sur France entière. Un indice tiré du calcul du bilan hydrique, le déficit d'évaporation cumulé sur l'année, indicateur de la sécheresse, est le meilleur facteur explicatif de l'axe 1 de l'AFC. Les ETP Thornthwaite annuelles sont les plus discriminantes de l'axe F2 de l'AFC, elles seraient liées à la croissance des espèces. Ceci est confirmé par l'étude des corrélations entre ces indices et la fertilité de plusieurs essences, qui met en avant les ETP Thornthwaite comme le facteur le plus explicatif de la fertilité pour *Picea abies* et *Fagus sylvatica*. *Quercus petraea* quant à lui réagit fortement à la RUM des sols.

Une grande majorité des indices réalisés dans le cadre de ce projet sont liés à la ressource forestière, et améliorent les modèles prédictifs. Il est nécessaire pour aller plus loin de les tester vis à vis d'un nombre plus important d'espèces. Des études complémentaires sont également nécessaires pour analyser les interactions entre ces indices et déterminer les plus pertinents pour prédire la distribution et la fertilité des espèces, ou de caractériser le type de station. Ces travaux complémentaires sont permis par l'existence de variables numériques spatialisées existant sur l'ensemble du pays. La porte est ainsi ouverte à des études régionalisées concernant la sensibilité des espèces au changement climatique sur le territoire Français.